

УДК 621.771

**Ю. М. ЮХНОВСКИЙ**, канд. техн. наук, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков;

**Д. Ю. КОНОНЕНКО**, инженер, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков;

**А. С. РУСАКОВ**, инженер, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков.

### УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ

Усовершенствована методика расчета энергосиловых параметров прокатки, более подходящая современным представлениям теории прокатки о течении металла. В ходе расчетов выведена формула для определения момента прокатки, с помощью которой можно также определить давление металла на валки или один из важнейших технологических параметров – уширение.

**Ключевые слова:** момент прокатки, работа и мощность прокатки, усилия прокатки, очаг деформации, уширение.

**Введение.** Большое значение для теории прокатки имеет вопрос определения энергосиловых параметров – давления металла на валки (сила прокатки), моментов, работы и мощности прокатки. На практике, как правило, известным параметром является мощность прокатки, определяемая по показателям приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров), устанавливаемых в схемах управления двигателями главных приводов. На основе этих параметров двигателя по общеизвестным методикам определяется момент прокатки с достаточной для инженерных расчетов степенью точности (3-5%). Следующим этапом расчета является определение силы прокатки по общепринятой в теории прокатки формуле:

$$M_{np} = 2P \cdot \psi \cdot l_d, \quad (1)$$

где  $P$  – давление металла на валки, тм;

$l_d$  – проекция дуги захвата на горизонтальную плоскость, м;

$\psi$  – плечо приложения равнодействующей.

**Цель исследования, постановка проблемы.** Формула (1) хотя и дает достаточно надежные результаты, но противоречит общепринятым представлениям о пластическом течении металла в зеве валков. Известно, что очаг деформации имеет две зоны скольжения: зону отставания и зону опережения. В первой зоне очага деформации силы трения направлены в сторону прокатки и, следовательно, осуществляют ее, а во второй зоне – направлены навстречу прокатке, препятствуя ей. Разность этих сил трения (избыточные силы трения) и создает момент прокатки на валках. Исходя из этой схемы следует, что при увеличении момента прокатки должна увеличиваться протяженность зоны отставания и, соответственно, уменьшаться зона опережения. Иными словами, коэффициент приложения равнодействующей ( $\psi$ ) должен уменьшиться и, наоборот, с уменьшением момента прокатки  $\psi$  должно возрасть. Таким образом, формула (1) полностью противоречит современным представлениям теории прокатки о течении

металла в зеве валков. Это объясняется тем, что эта формула выводилась на основе предпосылки, суть которой заключается в том, что момент прокатки приравняется к моменту вертикальных сил давления, а горизонтальные силы давлений уравниваются избыточными силами трения в очаге деформации.

**Материалы исследований.** На самом деле давление металла на валки не создает никакого момента относительно оси прокатки, силы прокатки нормальны к поверхности инструмента и, следовательно, их равнодействующая проходит через ось вращения валков.

Формула для определения угла захвата:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}. \quad (2)$$

Эта зависимость будет в дальнейшем использована при определении момента прокатки.

На основании изложенного следует предположить, что правильным методом определения моментов прокатки следует считать метод, основанный либо на определении величины избыточных сил трения в очаге деформации, либо, по общеизвестной формуле, связывающей величину момента и мощности:

$$M = 0,975 \frac{N}{n}. \quad (3)$$

Поскольку распределение сил трения в очаге деформации не известно, а их величина зависит от целого ряда факторов (скорости прокатки, температуры металла, силы прокатки и т.д.), определить с достаточной точностью момент прокатки этим способом не представляется возможным.

Альтернативным способом определения данного параметра является путь через мощность или работу деформации. Этот путь весьма широко используется с применением известной формулы Финка:

$$A = p \cdot F \cdot l_d \cdot \ln \mu, \quad (4)$$

где  $p$  – среднее давление металла, МПа;

$F$  – средняя площадь сечения очага деформации, мм<sup>2</sup>;

$l_d$  – длина проекции дуги захвата на горизонтальную плоскость, мм;

$\mu$  – вытяжка металла,

либо с помощью любых известных в математической теории пластичности формул, с использованием одного из математических методов, например, визоупластичности и вариационного метода. В любом случае нужно всегда помнить о том, что все эти методы определяют суммарную работу касательных напряжений и контактных сил трения в зонах отставания и опережения, а момент прокатки следует определять как разницу моментов, в отличие от того, что сегодня это не учитывается и данный суммарный момент и считается моментом прокатки, что, как было сказано выше, является неверным.

Определим момент прокатки из самых простых соображений через работу деформации как вертикальных усилий, так и горизонтальных сил,

находящихся в плоскости прокатки и в горизонтальной плоскости, перпендикулярной ей (поперечных сил), создающих неравномерную деформацию по ширине прокатываемой полосы.

Прежде чем приступить к выводу формулы момента, необходимо уточнить схему течения металла в очаге деформации. Как было сказано выше, помимо зоны отставания и зоны опережения имеется зона затрудненной деформации. В этой зоне отсутствует пластическое течение металла, а значит, отсутствуют касательные напряжения, и все частицы металла двигаются со скоростью инструмента (валков). Таким образом, данная область является как бы продолжением инструмента (валков) и, как следствие, причиной поперечного течения металла в уширение. Из теории упругости и теории пластичности известно, что такой областью может являться только геометрическая фигура – шар, или как это называется в тензорном анализе, – нулевой тензор. Поэтому единственной формой, которую может иметь зона затрудненной деформации, является среда. Так, например, эта область может представлять две полусферы, лежащих на верхней и нижней контактных поверхностях. Можно предположить, что вторые полусферы этих нулевых тензоров расположены в инструменте – прокатных валках. В целом, общий объем зоны затрудненной деформации составляет полную среду, половинки которой находятся на верхней и нижней контактных поверхностях.

Диаметр среды определяется геометрическими размерами очага деформации. Так, для тонких широких полос ( $l_d/h_{cp} > 3$ ) диаметр среды равен средней высоте полосы ( $h_{cp}$ ), и вершины двух полусфер соприкасаются в середине полосы. Для узких высоких полос ( $l_d/h_{cp} > 0,2-0,5$ ) диаметр среды определяется шириной полосы ( $D_{ср.д.} = B_{cp}$ ). Для широких толстых полос ( $l_d/h_{cp} > 0,5-2$ ) диаметр среды равен  $l_d$  (длине очага деформации). В тех случаях, когда полусферы зон затрудненной деформации не соприкасаются своими поверхностями, в зазоре между ними появляется промежуточная сфера затрудненной деформации, диаметр которой возрастает с увеличением зазора между контактными зонами затрудненной деформации.

Этот вариант зон затрудненной деформации характерен для высоких полос ( $l_d/h_{cp} > 0,2-0,3$ ) и сопровождается появлением двойной бочки уширения на боковых поверхностях. В данной работе эти случаи прокатки не рассматриваются, поскольку с выводом из технологического потока блюмингов и заготовочных станов и заменой их установками непрерывной разливки стали (УНРС) эти случаи прокатки утратили свое практическое значение.

Определим основные составляющие давлений в очаге деформации, совершающие работу.

Вертикальное давление металла на валки, совершающие работу по перемещению металла на величину обжатия  $\Delta h$ , определяется выражением:

$$P_v = P \cos \gamma, \quad (5)$$

где  $P$  – суммарное усилие металла на валки;

$\gamma$  – нейтральный угол.

Горизонтальное давление металла на валки в направлении прокатки, совершающее работу по перемещению металла вдоль очага деформации, равно:

$$P_{гор.} = P \sin \gamma. \quad (6)$$

Горизонтальная составляющая, совершающая работу по перемещению металла в направлении уширения и определяемая наличием зоны затрудненной деформации, равна:

$$P_{зд} = P \cdot \sin \eta; \quad (7)$$

$$P_{зд} = \frac{P}{B_{cp} \cdot l_o} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin \eta, \quad (8)$$

где  $P_{зд}$  – горизонтальная составляющая половины зоны затрудненной деформации;

$\eta$  – угол между равнодействующей давления зоны затрудненной деформации и горизонтальной плоскостью. Этот угол всегда будет равен  $45^\circ$ .

Составим основное уравнение работы, совершаемой усилием прокатки в очаге деформации:

$$A_{\Sigma} = A_{\epsilon} + A_{вер} + A_{уш}, \quad (9)$$

$$A_{\Sigma} = P \cdot \cos \gamma \cdot \Delta h + 2P \sin \gamma \cdot l_o + 2 \frac{P \cdot \pi D^2}{B_{cp} \cdot l_o \cdot 4} \cdot \frac{\sin \eta}{\cos \gamma}, \quad (10)$$

$$A_{\Sigma} = 2P \cdot \cos \gamma \cdot \Delta h (0,5 + \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{l_o}{\Delta h} + \frac{\pi D^2}{4 \cdot B_{cp} \cdot l_o} \cdot \frac{\sin \eta}{\cos \gamma} \cdot \frac{\Delta b}{\Delta h}), \quad (11)$$

$$A_{\Sigma} = 2P_{\epsilon} \cdot \Delta h (0,5 + \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{l_o}{\Delta h} + \frac{\pi D^2}{4 \cdot B_{cp} \cdot l_o} \cdot \frac{\sin \eta}{\cos \gamma} \cdot \frac{\Delta b}{\Delta h}). \quad (12)$$

Заменим  $\operatorname{tg} \gamma$  самой величиной угла  $\gamma$ , что допустимо в инженерной практике, учитывая, что угол  $\gamma$  не превышает  $10^\circ$ , а также обозначая величину  $\frac{\pi D^2}{4 \cdot B_{cp} \cdot l_o} \cdot \frac{\sin \eta}{\cos \gamma}$  коэффициентом  $K$ . Как было замечено выше, величина  $K$  легко вычисляется по данным геометрического очага деформации. С учетом изложенного выражение (12) получает вид:

$$A_{\Sigma} = 2P_{\epsilon} \cdot \Delta h (0,5 + \gamma \frac{l_o}{\Delta h} + K \frac{\Delta b}{\Delta h}). \quad (13)$$

Подставляя значения  $\gamma = \alpha \psi$ ,  $l_o = \sqrt{R \cdot \Delta h}$ , получаем:

$$A_{\Sigma} = 2P_{\epsilon} \cdot \Delta h (0,5 + \psi + K \frac{\Delta b}{\Delta h}). \quad (14)$$

Зависимость между моментом и мощностью выражается общеизвестной формулой (13).

Связь между работой в кгм и киловатт составляет  $1 \text{ кВт} = 106 \text{ кгм}$ . Работа  $A$  в единицу времени равна мощности:

$$N = \frac{A}{t}. \quad (15)$$

Учитывая вышеприведенные зависимости, можно выражение момента представить в следующем виде:

$$M_{\Sigma} = 0,975 \frac{A}{n \cdot t}. \quad (16)$$

Секундная скорость прокатки равна:

$$t = \frac{l}{v}; \quad v = \omega \cdot R; \quad \omega = \frac{\pi R}{30}. \quad (17)$$

Подставляя приведенные зависимости в выражение момента, получаем:

$$M_{\Sigma} = 0,975 \frac{106A \cdot \pi R}{10 \cdot l_0 \cdot 30}. \quad (18)$$

Окончательное выражение момента в тм получит вид:

$$M_{\Sigma} = 1,003 \cdot \frac{A \cdot R}{l_0}; \quad (19)$$

С учетом выражения работы (13) суммарный момент будет равен:

$$M_{\Sigma} = 2P \cdot l_0 (0,5 + \psi + K \frac{\Delta b}{\Delta h}). \quad (20)$$

Полученный момент (20) мог бы быть моментом прокатки, если бы все касательные напряжения и силы трения на контакте были бы направлены в одном направлении. На самом деле касательные напряжения в зоне отставания направлены в сторону прокатки и способствует последней, а в зоне опережения они направлены в противоположную сторону и препятствуют ей. Поэтому истинный момент прокатки будет равен разности этих моментов.

В соответствии с изложенным можно предположить с достаточной степенью достоверности, что работы и моменты прокатки в этих зонах прямо пропорциональны геометрическим размерам этих зон.

Обозначим момент в зоне опережения через  $M_{оп.}$ , а в зоне отставания через  $M_{отст.}$  Можно написать следующие уравнения:

$$M_{он.} = \psi \cdot M_{\Sigma}. \quad (21)$$

Момент в зоне отставания:

$$M_{отст.} = M_{\Sigma} - \psi M_{\Sigma} = M_{\Sigma} (1 - \psi).$$

Момент прокатки будет равен:

$$M_{np} = M_{\Sigma} (1 - \psi) - M_{\Sigma} = M_{\Sigma} (1 - 2\psi). \quad (22)$$

Кроме того, при выводе формулы моментов прокатки следует предположить, что уширение развивается только в зоне отставания, а в зоне опережения оно отсутствует. Исходя из этого, момент в зоне опережения следует рассчитывать при уширении ( $\Delta b$ ), равным нулю, или по формуле

$$M_{\Sigma}^I = 2Pl_o(0,5 + 2\psi). \quad (23)$$

На основании изложенного следует:  
момент в зоне опережения:

$$M_{on} = M_{\Sigma}^I \cdot \psi = 2Pl_o(0,5 + 2\psi) \cdot \psi, \quad (24)$$

момент в зоне отставания:

$$M_{отст.} = M_{\Sigma} - M_{онр.} = 2Pl_o \left[ (0,5 + 2\psi) + K \frac{\Delta b}{\Delta h} - (0,5 + 2\psi)\psi \right]. \quad (25)$$

Момент прокатки определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} M_{np} &= M_{отст.} - M_{онр.} = 2 \cdot Pl_o \left\{ \left[ (0,5 + 2\psi) + K \frac{\Delta b}{\Delta h} - (0,5 + 2\psi)\psi \right] - (1 + 2\psi)\psi \right\} = \\ &= 2Pl_o \left[ 1 + 2\psi + K \frac{\Delta b}{\Delta h} - \psi - 2\psi^2 - \psi - 2\psi^2 \right] \\ M_{np} &= 2Pl_o \left[ (0,5 - 2\psi^2) + K \frac{\Delta b}{\Delta h} \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

**Результаты исследований.** Полученная формула носит универсальный характер и может использоваться в широком диапазоне изменения геометрических параметров очага деформации ( $l_d/h_{cp} > 0,5-5$ ), при прокатке листов, полос и прямоугольных заготовок.

Исходя из принципа суперпозиции, формулу (26) можно рассматривать как суммарный момент прокатки, состоящий из двух составляющих: одной – обусловленной наличием касательных напряжений по высоте полосы, и другой – определяемой неравномерностью поперечных касательных напряжений по ширине полосы.

Если нарисовать график распределения суммарного момента и его составляющих в функции отношения ( $l_d/h_{cp}$ ), то получится закономерность, представленная на рис. 1.

Аналогичная зависимость давлений от величины  $l_d/h_{cp}$  была получена при обработке результатов исследований, полученных ранее УкрНИИМет (1960-1978) [1-3] на блюминге-слябинге Алчевского металлургического комбината, блюминге «Азовсталь» и непрерывном листовом стане 1700 горячей прокатки металлургического завода им. Ильича. Из полученного массива данных отбирались лишь те, которые, во-первых, охватывали весь диапазон изменений ( $l_d/h_{cp}$ ) от 0,2-5, а во-вторых, для одних и тех же марок стали (низколегированных, ст3, ст5), прокатываемых в диапазоне приблизительно одинаковых температур (1050–900 С). Результаты исследований давлений в зависимости от  $l_d/h_{cp}$  приведены на рис. 2.

Характер зависимости этих параметров совпадает с полученным расчетным путем и приведенным на рис. 1.

Это подтверждает правильность вышеприведенных расчетов.

Так, например, в процессе проведения исследований чаще всего изменяется момент прокатки по току двигателя главного привода. В этом

случае по формуле (26) легко определяется давление металла на валки  $P$ , а при известных величинах  $M_{пр}$  и  $P$  можно определить один из важнейших технологических параметров – уширение, без которого невозможно правильно сконструировать калибровку.

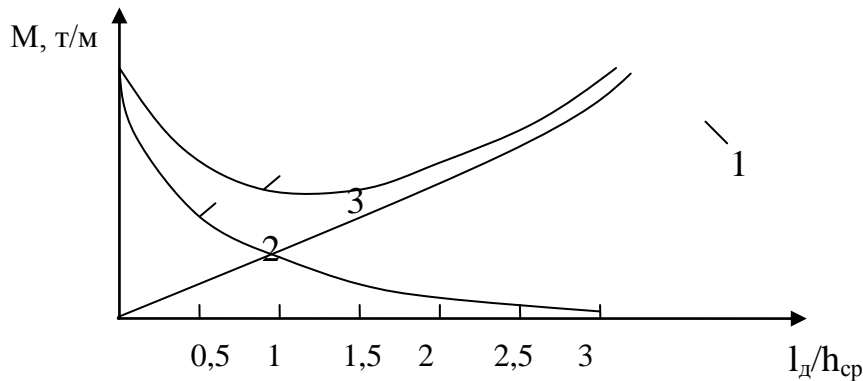


Рис. 1 – График распределения суммарного момента и его составляющих:

- 1 – момент прокатки, обусловленный наличием высотной неравномерности деформации;
- 2 – момент прокатки, обусловленный наличием поперечной неравномерности деформации;
- 3 – суммарный момент прокатки

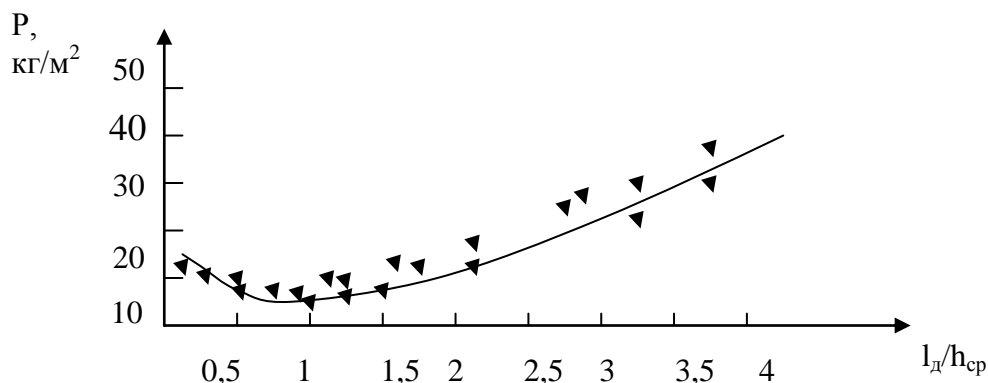


Рис. 2 – Результаты исследований удельных давлений

### Выводы:

1 Рассмотрена схема пластического течения металла в зеве валков, позволяющая производить расчет зоны затрудненной деформации. Эти расчеты необходимы для определения поперечных горизонтальных усилий, которые используются в дальнейшем при расчете работы образования уширения.

2. Определены моменты прокатки как разность их в зонах отставания и опережения. Поскольку считается, что уширение образуется только в зоне отставания, работа и момент прокатки в зоне опережения определяются без учета горизонтальных усилий.

3. Получена формула для определения моментов прокатки, учитывающая работу всех сил в очаге деформации и отвечающая современным представлениям о пластическом течении металла в зеве валков.

4. Характер зависимости момента прокатки от параметра  $l_d/h_{cp}$ , полученный расчетным путем по предлагаемой формуле, полностью совпадает с экспериментальной зависимостью удельного давления от того же параметра ( $l_d/h_{cp}$ ), полученной по данным исследований УкрНИИМет на блюминге-слябинге Алчевского металлургического комбината, блюминге «Азовсталь» и на стане 1700 горячей прокатки металлургического завода им. Ильича. Это подтверждает правильность формулы, полученной в данном исследовании.

5. Полученная формула момента может использоваться для расчета важнейших технологических параметров – уширения – при известных энергосиловых параметрах, полученных экспериментально либо другими теоретическими расчетными методами.

**Список литературы:** 1. Юхновский Ю.М. Инженерная методика расчета энергосиловых параметров прокатки фасонных профилей // Производство сортовых и гнутых профилей проката: отраслевой сборник. – Харьков, УкрНИИМет, 1996. – С. 30–38. 2. Александров П.А. Исследования и разборка рациональных режимов обжатий на блюминге-слябинге Коммунарского мет. завода / П.А. Александров, И.В. Гунин, Ф.Е. Должиков и др. // Отраслевой сборник трудов УкрНИИМет. Вып. VII. – Харьков, 1960. – С. 46–52. 3. Пиразев Д.И. Исследования давлений металла на валки, крутящих моментов и загруженности двигателя главного привода, при прокатке слитков на блюминге 1150 «Азовсталь» / Д.И. Пиразев, Ф.Р. Волчек, Ю.М. Юхновский // Сборник трудов УкрНИИМет. Вып. VIII. – Харьков, 1962. – С. 12–16. 4. Мелешко А.М. Энергосиловые параметры прокатки на непрерывном тонколистовом стане 1700 завода им. Ильича / А.М. Мелешко, Ю.М. Юхновский и др. // Сборник трудов УкрНИИМет. Вып. XVIII. – Харьков, 1970. – С. 27–32.

Надійшла до редакції 28.10.2013

УДК 621.771

**Усовершенствованная методика расчета энергосиловых параметров прокатки / Юхновский Ю. М., Кононенко Д. Ю., Русаков А. С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 217–224. Бібліогр.: 4 назв.**

Удосконалено методику розрахунку енергосилових параметрів прокатки, більш підходяща сучасним уявленням теорії прокатки про течію металу. У ході розрахунків виведено формулу для визначення моменту прокатки, за допомогою якої можна також визначити тиск металу на валки, або один з найважливіших технологічних параметрів – розширення.

**Ключові слова:** момент, робота і потужність прокатки, зусилля прокатки, осередок деформації, розширення.

Advancement on the method for calculating energy and power parameters of rolling that is more aligned with the modern presentation of rolling theory on metal flow. Derived during calculations is a formula for determining the rolling point, with the aid of which can also be determined the pressure exerted by metal on the roller, or one of the most important process parameters – broadening.

**Keywords:** point, work and power rolling, rolling force, deformation zone, broadening.

УДК 621.852.13: 621.73: 621.979.134

**А. В. ЯВТУШЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запоріжжє

## **РАСЧЕТ СКОЛЬЖЕНИЯ КЛИНОРЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕССА**

В статье представлена методика расчета скольжения клиноременной передачи механического пресса. Использование энергетического метода позволило получить приближенное решение зависимости Понселе, на основании которой получены аналитические зависимости для расчета скольжения от касательного и радиального скольжения ремня. Приведено уточнение коэффициента тяги передачи.